T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	免震層の非線形性を考慮したアクティブ制御系の等価モデルの構築と設計手法 （その 1：等価線形化モデルの構築）
Title(English)	Design method for active base isolation with nonlinear component Part 1: Construction of equivalent linear model
著者(和文)	宮本皓, 陳引力, 佐藤大樹, 余錦華
Authors(English)	Kou Miyamoto, Yinli Chen, Daiki Sato, Jinhua She
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 545-546
Citation(English)	, , , pp. 545-546
発行日 / Pub. date	2021, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

日本建築学会大会学術講演梗概集
（東海） 2021 年 9 月

免震層の非線形性を考慮したアクティブ制御系の等価モデルの構築と設計手法
（その 1：等価線形化モデルの構築）

アクティブ制御　非線形　LQR
免震構造　アクティブ免震

正会員　○宮本　皓[*1]　同 陳　引力[*2,3]
同　佐藤大樹[*4]　同 佘　錦華[*5]

1. はじめに

地震から建築物を防ぎ、被害を最小限にすることを目的として、多くの建築物で免震構造を採用するケースが増えている [1)]。特に日本では、兵庫県南部地震の後からその採用数が急激し、住宅やオフィスをはじめ、様々な用途の建築物に適用されている。また、近年では、制御性能をさらに向上させることを目的として、アクティブ制御と組み合わせる手法（アクティブ免震）も提案され、実現例も報告されている [2)]。アクティブ制御を用いることで、従来のパッシブ制御よりも見掛け上高い減衰定数が得られ、優れた制御性能が得られる一方で、設計のためのパラメーターが増える欠点がある。制御駆設計時のパラメータチューニングの方法はさまざまな方法が提案されており、特に、建築物のアクティブ制御を対象としたものとしては、筆者らによって、ベイズ最適化を用いたもの [3)]や、建築物の構造設計で用いられている応答スペクトルをアクティブ制御へ拡張した手法 [4)]などがある。これらの研究は線形系を対象としたものであったが、多くの免震構造は非線形要素を含むため、非線形系への拡張を行うことで、より多くの建築物へ適用が可能となる。

本論文では、この問題を解決するために、履歴型ダンパーを有し、非線形特性を有する免震構造建築物を対象として、制御系設計時のパラメータチューニング法の提案を行う。本報その 1 では、等価線形化手法を用いて、非線形ダンパーを有するアクティブ免震モデルを等価な線形モデルへと変換し、そのときの系の減衰定数および固有周期である、等価減衰定数および等価剛性（等価固有周期）を算出する。本報その 2 では、その 1 で得られた等価線形化モデルと、非線形モデルの解析結果を比較することにより、妥当性の検討を行い、さらに、応答スペクトルを用いた、非線形特性をもつアクティブ免震の設計手法の提案を行う。

2. 制御対象モデルと入力地震波の概要

本研究では Fig. 1 で示される非線形ダンパー（履歴型ダンパー）を有するアクティブ免震のモデルを用いる。なお、モデルのパラメーターは Table 1 の通りである。

このモデルの運動方程式は次式により与えられる。

$$m\ddot{x}(t) + c_f\dot{x}(t) + k_f x(t) + F_d(t) = -m\ddot{x}_g(t) - u(t) \qquad (1)$$

ここに，x：応答変位，m：質量，k：剛性，c：減衰係数，F_d：ダンパーの復元力，$\ddot{x}_g$：地動加速度，u：制御力である。本研究は履歴型ダンパーを用い，その復元力の特性を Fig. 2 に示す。ここで、履歴ダンパーの剛性 k_d は次式で定義される。

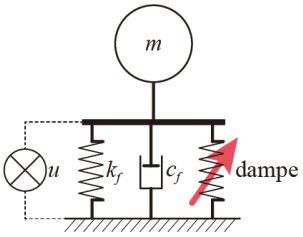

Fig.1. Active isolation with hysteresis damper

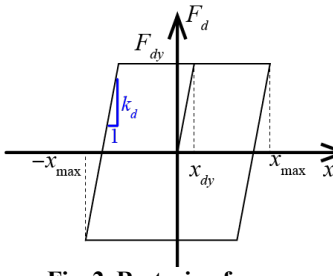

Fig. 2. Restoring force characteristics of hysteresis damper

Table. 1. Parameters of structure

Mass	Stiffness	Damping coefficient
1.00 kg	9.87 N/m	0.13 Ns/m

$$k_d = \frac{F_{dy}}{x_{dy}} \qquad (2)$$

式中において，F_{dy} はダンパーの降伏力であり，x_{dy} は降伏変位である。ここで、ダンパーの降伏力は

$$F_{dy} = \alpha_{dy} mg \qquad (3)$$

で与えられる。ここに，g は重力加速度であり，α_{dy} はダンパー降伏時のせん断力係数である。Table 2 に履歴型ダンパーのパラメーターを示す。

Table. 2. Damper parameters

Parameter	Symbol	Value
Shear-force ratio	α_{dy}	0.03
Yield displacement	x_{dy}	0.03 m
Yield Force	F_{dy}	0.29 N
Initial stiffness	k_d	9.80 N/m

3. 制御系の設計

式(1)の運動方程式を次式の状態方程式に変換する。

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) - \mathbf{B_d}F_d(t) + \mathbf{B_g}\ddot{x}_g(t) - \mathbf{B_u}u(t) \qquad (4)$$

になる。ここに，$\mathbf{z}$：状態ベクトル，$\mathbf{A}$：システムマトリックス，$\mathbf{B_d}$：ダンパー入力ゲイン，$\mathbf{B_u}$：制御入力ゲイン，$\mathbf{B_g}$：地震入力ゲインである。$\mathbf{z}$，$\mathbf{A}$，$\mathbf{B_u}$，$\mathbf{B_d}$ は式(5)による。

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\dfrac{k}{m} & -\dfrac{c}{m} \end{bmatrix} \qquad (5a, b)$$

$$\mathbf{B_d} = \mathbf{B_u} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{1}{m} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \qquad \mathbf{B_g} = [0 \quad -1]^{\mathrm{T}}. \qquad (5c, d, e)$$

ここで、制御力 $u(t)$は以下の制御則に従う。

$$u(t) = \mathbf{K_P}\mathbf{z}(t) = [K_{PD} \quad K_{PV}][x(t) \quad \dot{x}(t)]^{\mathrm{T}} \qquad (6)$$

Design method for active base isolation with nonlinear component
Part 1: Construction of equivalent linear model

MIYAMOTO Kou
Chen Yinli
SATO Daiki
SHE Jinhua,

ここに，$\mathbf{K_P}$：フィードバックゲインであり，K_{PD} と K_{PV} はそれぞれ変位および速度応答に対するフィードバックゲインである。Fig.3 に制御系のブロック線図を示す。

本報では Linea quadratic regulator (LQR)を用いて，コントローラゲインを設計し、次式の評価関数 J を最小にするように決定される。

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{z}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{Q}\mathbf{z}(t) + u^{\mathrm{T}}(t)Ru(t)]\mathrm{d}t \tag{7}$$

ここで, $\mathbf{Q}$ と $\mathbf{R}$ はそれぞれ状態と制御力に対する重みである。本報では $\mathbf{Q}$ と $\mathbf{R}$ を次式のように設定する。

$$\mathbf{Q} = q\mathbf{I}, \qquad R = 1 \tag{8a, b}$$

ここに，q (>0)は重み指数，$\mathbf{I}$ は単位行列である。式(7)より，フィードバックゲイン $\mathbf{K_P}$ は

$$\mathbf{K_P} = -\mathbf{B_u^T P} \tag{9}$$

で計算され，ここで，$\mathbf{P}$ は次式表されるリカッチ代数方程式の解である [8]。

$$\mathbf{A^T P} + \mathbf{PA} - \mathbf{PB_u R B_u^T P} + q\mathbf{I} = \mathbf{0} \tag{10}$$

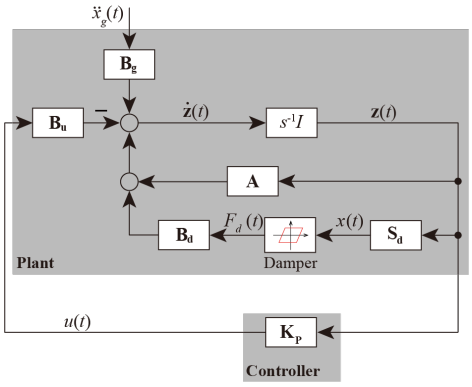

Fig. 3. Configuration of control system

4. 非線形アクティブモデルの等価モデル

本章では、非線形特性を有するアクティブ免震の等価線形化モデルの構築を行う。

4.1 非線形アクティブモデルの等価モデル

非線形履歴ダンパーの復元力を等価線形のバネとダッシュポットで置き換えることより，

$$F_{d,\mathrm{eq}}(t) = k_{d,\mathrm{eq}}x(t) + c_{d,\mathrm{eq}}\dot{x}(t) \tag{11}$$

が得られる。ここに，$F_{d,\mathrm{eq}}$：非線形履歴ダンパーの等価線形復元力，$k_{d,\mathrm{eq}}$：履歴ダンパーの等価剛性，$c_{d,\mathrm{eq}}$：履歴ダンパーの等価粘性係数である。

式(6)と式(11)を式(1)に代入すると，等価モデルの運動方程式になる。

$$m\ddot{x}(t) + c_{\mathrm{eq}}\dot{x}(t) + k_{\mathrm{eq}}x(t) = -m\ddot{x}_g(t) \tag{12}$$

ここで，k_{eq} と c_{eq} はそれぞれ等価モデルの剛性と粘性係数であり，k_{eq} と c_{eq} は次式で定義される。

$$k_{\mathrm{eq}} = k + K_{PD} + k_{d,\mathrm{eq}} \tag{13a}$$

$$c_{\mathrm{eq}} = c + K_{PV} + c_{d,\mathrm{eq}} \tag{13b}$$

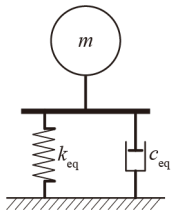

Fig. 4. Equivalent model of active isolation with hysteresis damper

4.2 履歴ダンパーの等価剛性と等価粘性係数の算出

履歴ダンパーの等価剛性は最大点剛性により算出する[Fig. 5(a)]。

$$k_{d,\mathrm{eq}} = \frac{F_{d,\max}}{x_{\max}} \tag{14}$$

ここに，$F_{d,\max}$ はダンパーの最大復元力であり，$x_{\max}$ は最大応答変位である。

履歴ダンパーの 1 サイクル間で吸収するエネルギー ΔW は

$$\Delta W = 4F_{dy}(x_{\max} - x_{dy}) \tag{15}$$

で計算され，剛性 k_{eq} を持つ粘性ダンパーの 1 サイクルで吸収するエネルギー ΔD は

$$\Delta D = \pi c_{d,\mathrm{eq}}\omega_{d,\mathrm{eq}}x_{\max}^2 \tag{16}$$

である[Fig. 5(b)]。ここに，$\omega_{d,\mathrm{eq}}$ は履歴ダンパーの等価剛性 $k_{d,\mathrm{eq}}$ に対する固有円振動数である。

$\Delta W = \Delta D$ と仮定することにより，等価モデルの粘性係数 $c_{d,\mathrm{eq}}$ が得られる。

$$c_{d,\mathrm{eq}} = \frac{4F_{dy}(x_{\max} - x_{dy})}{\pi\omega_{\mathrm{eq}}x_{\max}^2} \tag{17}$$

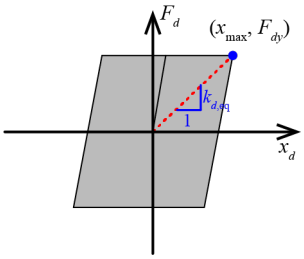

Fig.1. Active isolation with hysteresis damper

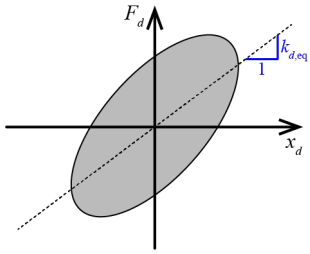

Fig. 2. Restoring force characteristics of hysteresis damper

5. まとめ

本報その 1 では，非線形特性を有するダンパー（履歴型ダンパー）をもつアクティブ免震を等価な線形系へと変換する手法について述べた。その 2 では、等価線形化により得られた等価剛性および等価減衰定数を有する線形モデルと、非線形モデルの応答を比較することにより、妥当性の検討を行う。

参考文献

参考文献はその 2 にまとめて示す

*1 清水建設　技術研究所　博士（工学）
*2 東京工業大学 建築学系　博士課程　修士（工学）
*3 日本学術振興会特別研究員 DC1
*4 東京工業大学　未来産業技術研究所　博士（工学）
*5 東京工科大学　工学部機械工学科　博士（工学）

*1 Shimizu Corporation. Institute of Tech. Dr. Eng.
*2 Tokyo Institute of Tech. Dept. of Arch. & Bldg. Eng. M.S. Eng.
*3 JSPS Research Fellows DC1
*4 Tokyo Institute of Tech. FIRST Dr. Eng.
*5 Tokyo University of Technology. Dept. of Mech. Eng. Dr. Eng.